

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

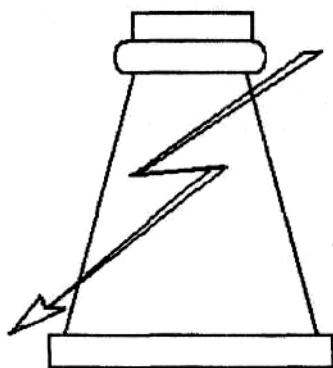
для виконання розрахунково-графічної роботи
з дисципліни

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

*(для студентів 4 курсу денної та 5 курсу заочної форм
навчання напряму підготовки*

*6.050701 – Електротехніка та електротехнології
та слухачів другої вищої освіти спеціальності*

7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання)



Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2016

Методичні вказівки для виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Техніка високих напруг» (для студентів 4 курсу денної і 5 курсу заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад.: В. Ф. Рой. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова , 2016.– 40 с.

Укладач д-р фіз.-мат. наук **В. Ф. Рой**

Рецензенти:

В. В. Рудаков, доктор технічних наук, професор Харківського національного технічного університету (ХПТ);

П. П. Рожков, кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.

Рекомендовано кафедрою енергопостачання та електроспоживання міст, протокол № 3 від 09.03.2016 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ЗАХИСТ ПІДСТАНЦІЇ ВІД ПРЯМИХ УДАРІВ БЛИСКАВКИ.....	7
2 РОЗРАХУНОК ЗОНИ ЗАХИСТУ ПІДСТАНЦІЙ.....	9
2.1 Розрахунок зони захисту одиночного блискавковідводу	9
2.2 Розрахунок зони захисту подвійного блискавковідводу	11
2.3 Розрахунок зони захисту о блискавковідводу різної висоти	12
2.4 Розрахунок зони захисту тросових блискавковідводів	14
2.5 Розрахунок допустимої відстані блискавковідводу до захищаємого об'єкта	16
3 РОЗРАХУНОК ГРОЗОЗАХИСНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ.....	17
3.1 Приклад 1 розрахунку заземлення	22
3.2 Приклад 2 розрахунку заземлення	23
4 ЗАХИСТ ПС ВІД ІМПУЛЬСІВ НАБІГАЮЧИХ ПЕРЕНАПРУГ.....	25
4.1 Внутрішні перенапруги	25
4.2 Грозові перенапруги	26
4.3 Схема заміщення для хвильових процесів	28
4.4 Приклад розрахунку захищеного підходу до ПС	33
5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ	35
Додаток А	36
Додаток Б	37
Додаток В	38
Додаток Г	39
СПИСОК ДЖЕРЕЛ	40

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- ДЖ – джерело живлення
- ГПП – головна понижуюча підстанція
- ТП – трансформаторна підстанція
- ПЛ – повітряна лінія електропередачі
- ПС – підстанція
- ВН – висока напруга
- НН – низька напруга
- ВРП – відкритий розподільчий пристрій
- КРП – комплектний розподільчий пристрій
- РУ – розподільчий пристрій
- КЗ – коротке замикання
- СКЗ – струм короткого замикання
- ТВП – трансформатор власних потреб
- ТН – трансформатор напруг
- ТС – трансформатор струму
- ШНВФ – шкідливі і небезпечні виробничі фактори
- ЕРС – електрорушійна сила
- БСК – батарея статичних конденсаторів
- РПН – пристрій регулювання напруги під навантаженням
- ЛЕП – лінії електропередач
- ПУБ – прямий удар блискавки
- ПУЕ – правила улаштування електроустановок
- МЕК – міжнародна електротехнічна комісія

ВСТУП

Дисципліна «Техніка високих напруг» вивчає природу виникнення та способи протидії грозовим та комутаційним перенапругам на ізоляційних конструкціях високовольтного електрообладнання; робочі характеристики та принцип дії апаратів захисту від перенапруг; координацію ізоляції та сучасні інженерні методи профілактичного контролю й випробування ізоляції різних типів енергетичного електрообладнання. Предметом вивчення дисципліни є основні механізми розвитку електродинамічних процесів у діелектричних елементах високовольтного електрообладнання та сучасних інженерних методів розрахунку параметрів грозозахисних систем, заземлюючих пристроїв; принципів захисту підстанцій і ЛЕП від прямих ударів блискавки і набігаючих по лінії імпульсів перенапруг; взаємозв'язок між електричними властивостями основних видів ізоляції, рівнями перенапруг, що впливають на неї, і характеристиками захисної апаратури; забезпечення безперебійної роботи високовольтного електроенергетичного обладнання в умовах дії грозових та комутаційних перенапруг та негативного впливу факторів зовнішнього середовища.

Складні проблеми, що виникають в сучасній електроенергетиці, потребують від спеціаліста творчого підходу, навичок дослідника. Тому сучасний спеціаліст повинен володіти не тільки фундаментальними знаннями в галузі електроенергетики, але і навичками творчого підходу до вирішення практичних питань, вмінням використовувати все нове, що з'являється в науці та практиці. Дана робота присвячена дослідженню взаємного зв'язку між електричними властивостями основних видів ізоляції, діючих перенапруг і характеристиками захисної апаратури, а також вимогам до ізоляційно-конструкційних установок високої напруги. Вона пропонує методику визначення електричної міцності простих ізоляційних конструкцій при дії на

ізоляцію грозових і внутрішніх перенапруг, а також надає необхідну інформацію про процеси, які призводять до погіршення характеристик ізоляції під час дії перенапруг.

При значній концентрації потужностей велике значення має надійність роботи ліній електропередач та усього комплексу обладнання: трансформаторів, генераторів, комутаційної апаратури, компенсуючих пристроїв. Значною мірою це забезпечується надійною роботою ізоляції електричних систем і обладнання при постійно діючих на неї короткочасно виникаючих внутрішніх або грозових перенапруг. Джерелом внутрішніх перенапруг є електрорушійні сили генераторів, а причиною – резонансні явища. Причинами грозових перенапруг є попадання блискавки в електрообладнання. Для захисту ЛЕП від ПУБ використовують заземлені троси, які підвішують на опорах вище проводів лінії, захищаючи їх від попадання блискавки. Сумісне використання блискавкозахисних тросів і автоматичного повторного включення призводить до мінімуму аварійних відключень повітряних ліній при враженнях блискавкою. Крім порушення ЛЕП, враження блискавки призводить до появи на лініях імпульсів високої напруги, які розповсюджуються по проводах, доходять до підстанцій і діють на ізоляцію електрообладнання. Таким чином, на ізоляцію електроустановок діють: робоча напруга, імпульси внутрішніх перенапруг, довготривале підвищення напруги, імпульси грозових перенапруг. Збільшення надійності роботи електрообладнання в значній мірі пов'язано з прогресом у розвитку захисної апаратури. Взаємне погодження величини діючих перенапруг, характеристик захисної апаратури і електричних характеристик ізоляцій, що забезпечують надійну роботу і високу економічність електричної установки – називають *координацією* ізоляції і є одним з основних завдань при проектуванні і експлуатації електрообладнання. Саме тому дисципліна «Техніка високих напруг» є базовою для усіх електроенергетичних і електротехнічних спеціальностей.

1 ЗАХИСТ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВІД УДАРІВ БЛИСКАВКИ

Інтенсивність грозової діяльності характеризується числом грозових днів або числом грозових годин у році. Вона істотно відрізняється для різних районів країни. У середньому на 1 км^2 площі Землі приходить приблизно 0,1 удару блискавки за один грозовий день. Число ударів N блискавки за рік за 100 грозових годин в споруду (ПС) з параметрами $A \times B$ і висотою h , (м) приблизно дорівнює

$$N = 6,7 \cdot (A + 7h) \cdot (B + 7h) \cdot 10^{-6} \quad (1.1)$$

Число ударів блискавки за рік у лінію електропередач довжиною 100 км при середній висоті підвісу верхнього проводу чи троса h_{cp} (м) приблизно дорівнює

$$N \approx 4 \cdot h_{cp} \quad (1.2)$$

Залежно від довжини ЛЕП і висоти опор середнє число ударів блискавки в лінію за рік коливається від 250 (для ліній 750 кВ) до 5 (для ліній 35 кВ). При відсутності спеціального грозозахисту і недостатньої імпульсної міцності ізоляції ці удари блискавки в більшості випадків призводили б до перекриття ізоляції лінії і їх відключенню. Припустимі імпульсні напруги для ізоляції електроустаткування визначаються гарантованою імпульсною міцністю, що встановлена трохи нижче імпульсних випробувальних напруг (для ізоляторів, електричних апаратів і вимірювальних трансформаторів – на 10÷15 %, для силових трансформаторів – на 25 %).

Прямий удар блискавки (ПУБ) є найбільш небезпечним з точки зору ураження споруд і електрообладнання, оскільки він супроводжується механічним або тепловим руйнуванням об'єкта ураження: розщепленням дерев'яних опор ЛЕП, руйнуванням бетонних та цегляних споруд, розплавленням проводів, виникненням пожеж. Вторинні прояви ПУБ виникають у вигляді електростатичної та електромагнітної індукції, які супроводжуються появою дуже високих потенціалів на металевих елементах електрообладнання.

Усі споруди залежно від їх призначення, інтенсивності грозової діяльності в місці їх розташування класифікуються трьома категоріями вибухо- і пожежонебезпечності.

До першої категорії відносять споруди, в яких присутні у відкритому стані небезпечні речовини, що можуть вибухнути від електричної іскри. До другої відносять споруди, в яких ці речовини присутні, але знаходяться у вогнестійких контейнерах. До третій – відносять усі інші споруди, де блискавка може спровокувати пожежу або механічні руйнування.

Від ПУБ електроустановки захищають стрижневими, тросовими або активними блискавковідводами, кожен з яких складається з блискавкоприймача, струмопроводу і заземлювача. Усі блискавковідводи поділяються на поодинокі, подвійні та багаторазові. Будівлі з добре заземленим металевим дахом не вимагають захисту блискавковідводами. У відкритих розподільних пристроях (ВРП) 110 кВ і вище дозволяється встановлювати блискавковідводи безпосередньо на металевих конструкціях, а у ВРП 35 кВ рекомендується встановлювати їх окремо.

Основними вихідними даними для розрахунку зони захисту об'єкта від ПУБ є його габарити, величина питомого опору ґрунту, геологічні та метеорологічні умови. Зони захисту поділяються на два типи: зона А має ступень захисту 99,5 % і вище; зона В – 95% і вище. Теоретичний аналіз експериментальних досліджень фізичної моделі свідчить, що зона захисту блискавковідводу являє собою конус, утворений гіперболою, яка обертається навколо вертикальної прямої (стрижня). Але для інженерних розрахунків гіпербола апроксимована ламаною лінією, що дозволило знайти простий аналітичний вираз, зручний для розрахунків.

2 РОЗРАХУНОК ЗОНИ ЗАХИСТУ ПІДСТАНЦІЙ

Приклад завдання.

Розрахувати графоаналітичним методом.

1 Зону захисту підстанції 110/10 кВ від прямих ударів блискавки

$A \times B = 84 \times 74$ (м) – площа захищеного об'єкта.

$h_x = 5$ м – висота захищеного об'єкта.

2 Побудувати графічну залежність радіусу зони захисту r_x від висоти блискавковідводу h_x і визначити їх оптимальне співвідношення.

3 Спроекувати та розрахувати грозозахисне заземлення.

4 Забезпечити захист ПС від набігаючих імпульсів перенапруг.

5 Розрахувати довжину захищеного підходу до ПС.

6 Побудувати графічну залежність довжини захищеного підходу до ПС від допустимої крутості фронту $a_{кр}$ імпульсу перенапруги.

2.1 Розрахунок зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу

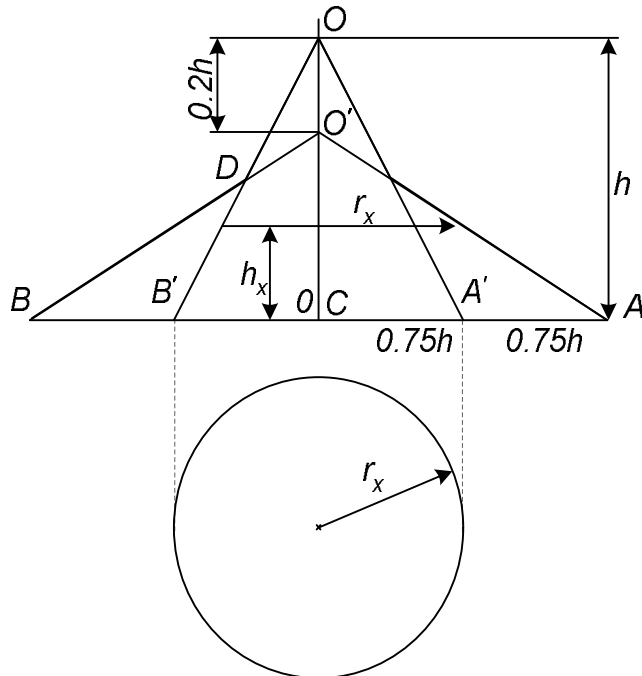


Рисунок 2.1 – Геометрична побудова зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу

Послідовність побудови зони захисту по (I_m) для блискавковідводів з висотою $h \leq 60$ м. наступна.

- 1 Відкладаємо від основи відрізки CA' , CB' на відстані $0,75h$;
- 2 На висоті $h_0 = 0,8 \cdot h$ ставимо точку O' ;
- 3 Точку O' з'єднуємо з A і B ($CA = CB = 1,5h$);
- 4 Точку O з'єднуємо з A' і B' .

Проводимо ламану лінію BDO , яка є твірною конуса зони захисту.

Для визначення радіуса зони захисту r_x на будь-якій висоті h_x 1-м методом (ламаної) використовуємо формули:

$$r_x = 1,5(h - 1,25h_x) \quad \text{при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h. \quad (2.1)$$

$$r_x = 0,75(h - h_x) \quad \text{при } h_x > \frac{2}{3}h. \quad (2.2)$$

Вирішуючи ці рівняння відносно висоти h блискавковідводу одержимо при заданих значеннях r_x і h_x оптимальну висоту блискавковідводу в метрах:

$$h_{opt} = \frac{r_x + 1,9h_x}{1,5}, \quad \text{і} \quad h_{opt} = \frac{r_x + 0,75h_x}{0,75}. \quad (2.3)$$

Величину r_x визначаємо з прямокутного трикутника, який утворений діагоналлю прямокутника і двома сторонами A і B

$$r_x = (\sqrt{A^2 + B^2}) / 2. \quad (2.4)$$

Для блискавковідводів з висотою $h \approx 60 \div 100$ зона захисту (I_m) визначається, виходячи з лімітованого радіуса основи конуса $r_x = 90$ м.

Тоді радіус зони захисту на висоті h_x визначають зі співвідношень:

$$r_x = 90(1 - 1,25h_x/h) \quad \text{при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h; \quad (2.5)$$

$$r_x = 45(1 - h_x/h) \quad \text{при } h_x > \frac{2}{3}h. \quad (2.6)$$

Визначення r_x за II методом (гіперболи) для блискавковідводів $h < 30$ м :

$$r_x = h_a \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}}, \quad (2.7)$$

і для $h > 30$ м:

$$r_x = h_a \frac{8,8}{\left(1 + \frac{h_x}{h}\right) \sqrt{h}}. \quad (2.8)$$

2.2 Розрахунок зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу

Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів, розташованих на відстані $L < 5 \cdot h$, більша за зону захисту двох окремих блискавковідводів і розраховується з відповідних геометричних побудов (рис. 2.2). Якщо стрижневі блискавковідводи знаходяться на відстані $L > 5h$, їх треба розраховувати як окремі.

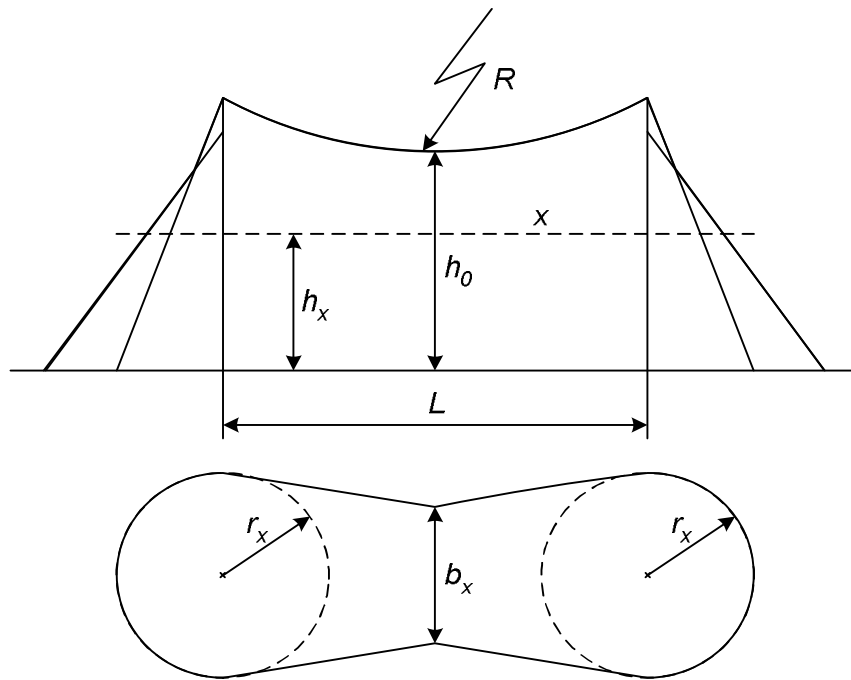


Рисунок 2.2 – Побудова зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу

Блискавковідвід вважають подвійним, якщо $L / h \leq 5$. Верхня межа зони захисту являє собою дугу радіусом $R = 4h - h_0$. Висоту h_0 обчислюємо за емпіричною формулою

$$h_0 = 4h - \sqrt{9h^2 - 0,25L^2}, \text{ м.} \quad (2.9)$$

Радіус кола R визначаємо таким чином $R = 4h - h_0$.

Якщо h_0 і L відомі, то оптимальну висоту h блискавковідводу знаходимо за формулою

$$h_{opt} = 0,571h_0 + \sqrt{0,183h_0^2 + 0,0357L^2}, \quad (2.10)$$

де h_0 обчислюється виходячи з необхідної ширини зони захисту b_x , яка визначається висотою об'єкта, що захищається, і його розмірами в горизонтальній площині:

$$b_x = 3(h_0 - 1,25h_x) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h, \quad (2.11)$$

$$b_x = 1,5(h_0 - h_x) \text{ при } h_x > \frac{2}{3}h, \quad (2.12)$$

вирішуючи їх відносно h_0 , знаходимо:

$$h_0 = \frac{b_x + 3,75h_x}{3} \quad \text{і} \quad h_0 = \frac{b_x + 1,5h_x}{1,5}. \quad (2.13)$$

2.3 Розрахунок зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу різної висоти

Спочатку будуємо зону захисту блискавковідводу більшої висоти і торцеву частину зони захисту нижчого блискавковідводу. Потім з вершини нижчого блискавковідводу проводимо горизонтальну лінію до перетину з утвірною першого і вважаємо точку перетину вершиною фіктивного блискавковідводу. Далі як звичайно, для двох однакових блискавковідводів будуємо зону захисту внутрішньої області (рис. 2.3).

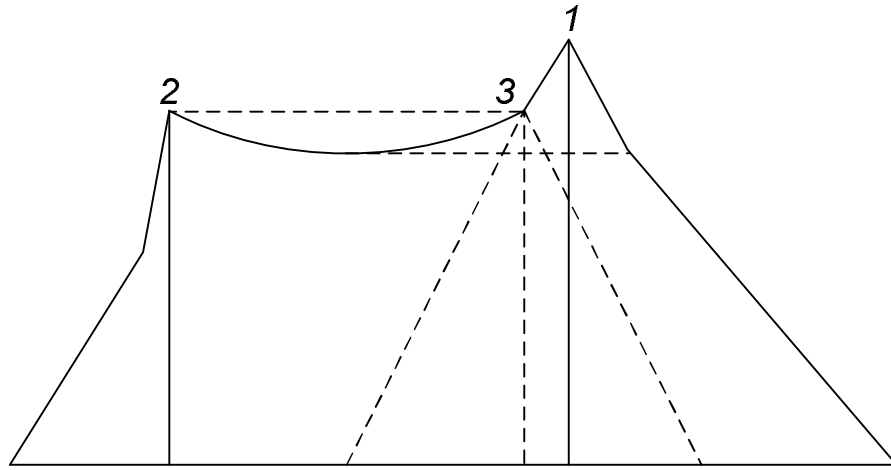


Рисунок 2.3 – Побудова зони захисту різновисотних блискавковідводів

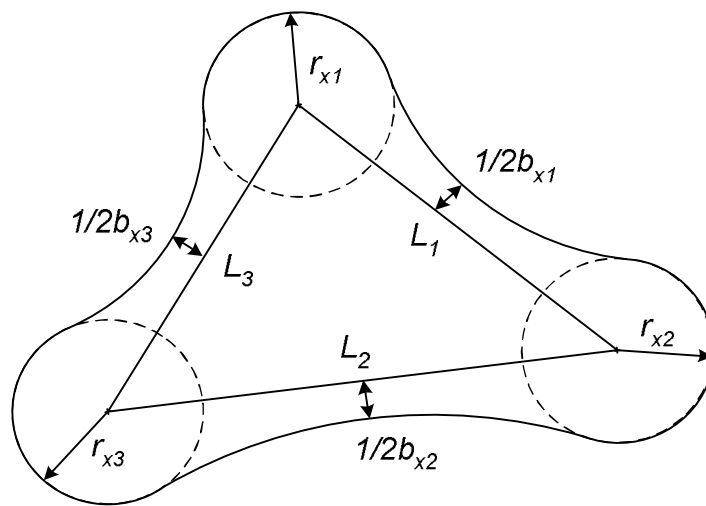


Рисунок 2.4 – Побудова зони захисту багаторазових блискавковідводів

Для розрахунку і побудови зовнішніх меж зони захисту використовують ті ж самі принципи, що і для поодиноких блискавковідводів. При цьому блискавковідводи рахують попарно як зони захисту подвійних блискавковідводів в такій послідовності: 1–2; 2–3; 3–1.

При використанні 4-х і більше стрижневих блискавковідводів необхідне виконання додаткових умов:

– для споруд 1-ої і 2-ої категорій треба приймати $h_0 \geq h_x$ для попарно взятих блискавковідводів, за діагоналями багатокутника, утвореного одиничними блискавковідводами;

– для споруд 3-ої категорії допускається $D \leq 5h_a$ (D – довжина діагоналі многокутника, складеного одиничними блискавковідводами);

– для блискавковідводів висотою $h > 30$ м значення D повинно бути зменшене на величину коефіцієнта $p = 5,5/\sqrt{h}$.

Умова непрориву блискавки в зону захисту має вигляд $D \leq 8h_a$.

2.4 – Розрахунок зони захисту тросових блискавковідводів

Розрахунок *першим* методом здійснюється таким чином:

$$r_x = 1,25(h_{mp} - 1,25h_x) \quad \text{при} \quad 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h_{mp}; \quad (2.14)$$

$$r_x = 0,625(h_{mp} - h_x) \quad \text{при} \quad h_x > \frac{2}{3}h_{mp}, \quad (2.15)$$

де h_{mp} – висота троса над об'єктом, що захищається;

$h_{mp} = h - f$, (f – стріла прогину).

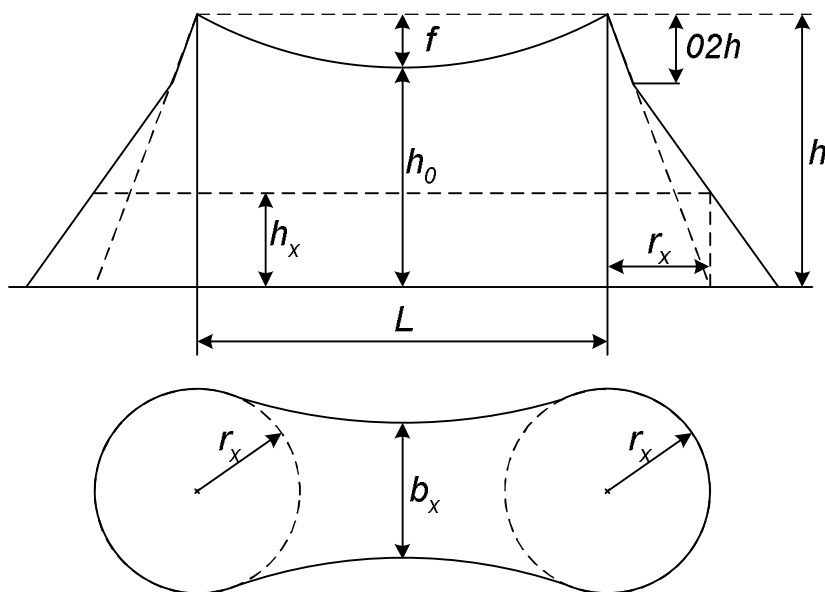


Рисунок 2.5 – Побудова зони захисту тросового блискавковідводу

Повна ширина зони захисту при $h_x = 0$, дорівнює: $2r_x = 2,5h_{mp}$.

За *другим* методом радіус захисту r_x визначаємо за формулою

$$r_x = h_a \frac{1,2}{1 + h_x/h_{mp}}. \quad (2.16)$$

Важливим техніко-економічним фактором є температура, що визначає стрілу прогину. За $T_{\max}^{\circ}\text{C}$ приймають 40°C . Стрілу прогину в будь-якій ділянці прольоту знаходимо таким чином:

$$f_{np} = 4f \cdot \frac{l_1}{L} \left(1 - \frac{l_1}{L}\right) - \text{при однакових рівнях підвісу}. \quad (2.17)$$

$$f_{np} = \frac{l_1}{L} \Delta h + 4f \cdot \frac{l_1}{L} \left(1 - \frac{l_1}{L}\right) - \text{при різних рівнях ділянок підвісу}. \quad (2.18)$$

Тут Δh – різниця відміток підвісу троса, м; l_1 – відстань від несучої конструкції з більшою висотою підвісу троса до розглянутої ділянки, м.

Грозі передусє вітер – трос відхиляється і об'єкт може бути уражений блискавкою. Відхилення троса визначається співвідношенням

$$\sin \varphi = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}, \quad (2.19)$$

де φ – кут відхилення троса; γ_1 – питоме навантаження на трос від тиску вітру, (Н/м·мм²);

γ_2 – питоме навантаження від власної маси троса і тиску вітру, (Н/м·мм²).

Горизонтальна проекція відхилення троса в будь-якій ділянці прольоту в м

$$c = f_n \cdot \sin \varphi. \quad (2.20)$$

Треба враховувати і збільшення висоти блискавкоприймача h_{mp} при його відхиленні Δh_{mp} від вітру

$$\Delta h_{mp} = f_n - \sqrt{f_n^2 - c^2}. \quad (2.21)$$

Тоді висота тросового блискавкоприймача у відхиленому положенні дорівнюватиме

$$h'_{mp} = h_{mp} + \Delta h_{mp}. \quad (2.22)$$

Для об'єкта, що захищається, необхідно виконати умову непрориву блискавки в зону захисту:

$$D \leq 8 \cdot h_a \quad (2.23)$$

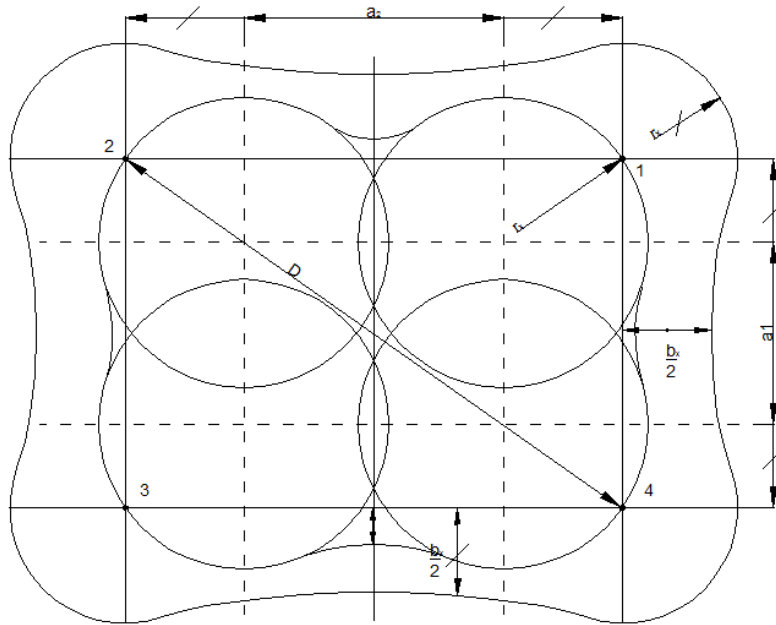


Рисунок 2.6 – Зона захисту чотирьох стрижневих блискавковідводів на рівні h_x

2.5. Розрахунок допустимої відстані блискавковідводу до захищеного об'єкта

Оскільки при ПУБ елементи блискавковідводу набувають високого потенціалу, – стає можливим попадання його на захищаний об'єкт. Тому необхідно розташовувати блискавковідвід на деякій відстані від об'єкта.

Ця відстань в повітрі S_n і в землі S_z залежить від імпульсної напруги і струму блискавки

$$U_i = \frac{I_{\phi}}{2} + \left[R_i + \sqrt{R_i^2 + (\omega \cdot L^2)} \right], \quad (2.24)$$

де I_{ϕ} – амплітуда імпульсу струму блискавки, кА; R_i – імпульсний опір заземлення, Ом; L – індуктивність струмопроводу, Гн.

Питома індуктивність струмопроводу $L_o = 1,5$ мк Гн/м. Максимальна крутість імпульсу струму блискавки – 60 кА/мкс. Амплітуда струму блискавки – 150кА.

Враховуючи, що $\omega = 2\pi / I_o$, то для струму 150 кА отримаємо $\omega \cdot L = 1,2 \cdot l$ (l – довжина струмопроводу, м).

Розрахункова імпульсна міцність повітря $U_n = 500$ кВ/м, землі: $U_z = 300$ кВ/м.

Тоді формули для визначення допустимої відстані S при струмі блискавки

$I_o = 150$ кА мають вигляд:

$$S_n = 0,15 \cdot (R_i + \sqrt{R_i^2 + 1,44l^2}); \quad (2.25)$$

$$S_z = 0,375 \cdot (R_i + \sqrt{R_i^2 + 1,44l^2}). \quad (2.26)$$

Виходячи з того, що $D = 192 \text{ м} \leq h_a \cdot p = 8 \cdot 24 = 192 \text{ м}$, прорив блискавки всередину зони, що захищається, буде неможливим.

3 РОЗРАХУНОК ГРОЗОЗАХИСНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ

Заземлювачі – це електротехнічні пристрої, призначені для створення надійних низькоомних заземлень блискавководів і струмопроводів, певних частин електричних машин і апаратів з метою грозозахисту і захисту від перенапруг, забезпечення прийнятних режимів роботи електроустановок, захисту їхнього персоналу від ураження електричним струмом. Розрізняють **робоче, захисне і грозозахисне** заземлення.

Робоче заземлення забезпечує нормальну роботу електроустановок, її частин і мереж відповідно до прийнятого для них режиму функціонування. Це -заземлення нейтралів силових трансформаторів, генераторів, реакторів поперечної компенсації на довгих лініях електропостачання.

Захисне заземлення забезпечує безпеку персоналу при обслуговуванні електроустановок. Це – заземлення зовнішніх металевих частин машин, трансформаторів, апаратів, які в нормальному режимі знаходяться не під напругою.

Грозозахисне заземлення необхідне для забезпечення ефективного грозозахисту електроустановок від перенапруг. До нього відносять заземлення стрижневих і тросових блискавковододів, металевих дахів, будівель та споруд, металевих та залізобетонних опор ліній електропередач та порталів розподільчих пристроїв, заземлення іскрових проміжків і розрядників. Заземлення складається із заземлювача, який безпосередньо розташований в землі, і струмопроводів, які з'єднують апарати, що заземлюються, із заземлювачем.

Опір розтіканню струму заземлювача залежить, в першу чергу, від питомого опору ґрунту ρ , вимірюваного в Ом·см. Величини ρ різних ґрунтів наведені в таблиці 3.1.

Опір заземлювача визначають згідно з ПУЕ за виразом

$$R_z \leq \frac{U_p}{I_6}, \quad \text{де } U_p = 125 \text{ кВ.} \quad (3.1)$$

Імпульсний опір заземлювача визначається добутком стаціонарного опору R_z на імпульсний коефіцієнт a_i : $R_i = a_i \cdot R_z$.

Для установок напругою більш, ніж 1 кВ, опір заземлюючого пристрою R_i повинен бути не більший за 0,5 Ом, при цьому опір штучного заземлювача не повинен перевищувати 1 Ом.

Таблиця 3.1 – Значення питомого опору ґрунтів

Ґрунти	Питомий опір ρ , Ом·см	Ґрунти	Питомий опір ρ , Ом·см
Пісок	$7 \cdot 10^4$	Садкова земля	$0,4 \cdot 10^4$
Супісок	$3 \cdot 10^4$	Чорнозем	$2 \cdot 10^4$
Суглинок	$4 \cdot 10^4$	Торф	$0,2 \cdot 10^4$
Глина	$0,4 \cdot 10^4$	Кам'яний ґрунт	$40 \cdot 10^4$

При розрахунках величини ρ , які наведені у табл. 3.1, повинні множитися на коефіцієнт сезонності K_c (табл.3.2.), що залежать від кліматичних зон і виду заземлювача.

Розподіл областей і країн за кліматичними зонами наводиться в електротехнічних довідниках. Україна відноситься до II кліматичної зони.

При розрахунках використовують природні заземлювачі – це, в першу чергу, сталеві водопровідні труби без антикорозійного покриття зі звареними стиками і свинцеві оболонки кабелів. Для попередніх розрахунків можна користатися даними про опір розтіканню водопровідних труб, наведеними у таблиці 3.3 для $\rho = 2 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнту сезонності для різних кліматичних зон

Кліматичні зони	Вид заземлювача	
	Протяжний	Стрижневий
	Коефіцієнт сезонності	
	K_n	K_c
I	7	2
II	4	1,7
III	2	1,4
IV	1,5	1,2

Оскільки водопровідні труби прокладаються нижче глибини промерзання ґрунту і мають приблизно постійний опір розтіканню на протязі всього року – для них коефіцієнт сезонності не використовують.

Дані про опір розтіканню струму металевих трубопроводів, прокладених на глибині 2 м при $\rho = 2 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Величина опору заземлювача у вигляді труби

Довжина підземної ділянки, м	Опір розтіканню Ом, при діаметрі труби, см		
	2,5	4	6
100	0,35	0,28	0,23
500	0,29	0,24	0,19
1000	0,25	0,2	0,17
2000	0,2	0,17	0,15

Таблиця 3.4 – Опір розтіканню струму свинцевих оболонкок кабелів при $\rho = 2 \cdot 10^4$ Ом·см на глибині прокладення 0,4 м

Довжина підземної ділянки, м	Опір розтіканню Ом, при перерізі кабелю, мм ²		
	16÷35	50÷95	120 і вище
50	2,1	1,6	1,2
100	2,0	1,5	1,1
200	1,8	1,4	1,0
500	1,4	1,1	0,8
1000	1,2	0,9	0,7

Використання кабелів зі свинцевою оболонкою в якості природних заземлювачів допускається, якщо їх покладено не менше двох.

Якщо у траншеї прокладено кілька кабелів, то загальний опір розтіканню струму з урахуванням явища взаємного екранування R_x визначається за

$$\text{формулою} \quad R_k = \frac{R_{ok}}{\sqrt{n}}, \quad (3.2)$$

де R_{ok} – опір розтіканню струму оболонки одного кабелю;

n – число кабелів в одній траншеї.

Якщо опір розтіканню природних заземлювачів перевищує необхідне за нормми, то додатково влаштовується штучний заземлювач, опір якого $R_{ш}$ визначається за формулою

$$R_{ш} \leq \frac{R_n \cdot R_i}{R_n - R_i}, \quad (3.3)$$

де R_i – величина опору пристрою, що заземлює, за нормами; R_n – опір природного заземлювача.

Провідність штучного заземлювача складається з провідності стрижневих і горизонтальних смугових елементів. Опір розтікання одиночного стрижневого заземлювача зі сталевій труби розраховуємо за формулою

$$R_g = \frac{0,366 \cdot \rho_p}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (3.4)$$

де l – довжина труби, см; d – зовнішній діаметр труби, см; t – відстань від поверхні ґрунту до середини труби, см.

Для застосовуваних на практиці труб довжиною 2,5 м, діаметром 0,06 м і глибиною занурення в ґрунт, рахуючи від поверхні ґрунту до верха труби 0,7 м, можна користуватися спрощеної формулою

$$R_m = 0,308 \cdot \rho. \quad (3.5)$$

Для кутової сталі 50 х 50 х 5 мм довжиною 2,5 м можна користуватися наступною формулою

$$R_k = 0,318 \cdot \rho. \quad (3.6)$$

Для кутової сталі 60 х 60 х 6 мм довжиною 2,5 м

$$R_k = 0,298 \cdot \rho. \quad (3.7)$$

Для протяжних заземлювачів опір розтіканню струму визначають для сталевий смуги довжиною l , шириною b і глибиною занурення t :

$$R_n = \frac{2,3 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \lg \frac{2l^2}{b \cdot t}, \quad (3.8)$$

для круглої сталі:

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{4l}{d}, \quad (3.9)$$

де d – діаметр круглої сталі, см; t – глибина закладення заземлювача, см.

Далі знаходять число стрижнів, враховуючи, що вони з'єднані паралельно за

формулою

$$n = \frac{R_{m\Sigma}}{R_{m1}}. \quad (3.10)$$

Елементи складного заземлювача, що складається із горизонтальних смуг та вертикальних електродів екранують один одного, зменшуючи його ефективність, що визначається коефіцієнтом використання, величина якого залежить від довжини та взаємного розташування цих елементів (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Коефіцієнт використання елементів заземлювача із смуг і вертикальних електродів

Відношення відстані між елементами до їх довжини	Число вертикальних електродів						
	4	6	8	10	20	30	50
1	0,45	0,40	0,36	0,34	0,27	0,24	0,21
2	0,55	0,48	0,43	0,40	0,31	0,30	0,28
3	0,70	0,64	0,60	0,56	0,45	0,41	0,37

3.1 Приклад 1 розрахунку заземлення

Потрібно розрахувати заземлення міської трансформаторної підстанції ПС 35/10 кВ з глухо заземленою нейтраллю на стороні низької напруги. Заземлення є загальним для устаткування високої та низької напруги. За даними енергосистеми струм замикання на землю (ємнісний) в даній точці мережі складає 100 А. До підстанції підведені три кабелі високої напруги АСБ – 10 кВ (3х95) довжиною по 500 м прокладені в одній траншеї. Підстанція розміщена в II кліматичній зоні; ґрунт – суглінок.

Оскільки заземлення є загальним для устаткування високої та низької напруги, опір розтікання повинен бути:

- для установок низької напруги – $R_z < 4 \text{ Ом}$;
- для установок високої напруги – $R_i < 125 / 150 = 0,8 \text{ Ом}$.

1 Визначаємо опір розтікання одиночного кабелю (див. табл. 3.1)

$R_{ок} = 1,1 \text{ Ом}$. З урахуванням коефіцієнту K_c сезонності для другої кліматичної зони (табл.3.2): $R_{ок} = 1,1 \cdot 1,7 = 1,87 \text{ Ом}$.

2 Загальний опір розтікання трьох кабелів буде

$$R_{3к} = \frac{R_{1к}}{\sqrt{3}} = \frac{1,87}{\sqrt{3}} = 1 \text{ Ом}.$$

3 Розрахунковий опір розтікання штучного заземлювача повинен бути не більше

$$R_{\text{ш}} = 1 \cdot 0,8 / 1 + 0,8 = 0,55 \text{ Ом.}$$

4 Враховуючи те, що до заземлюючого пристрою приєднуються об'єкти високої напруги, виконуємо його у вигляді замкненого контуру.

5 Приймаємо орієнтовно 20 стрижнів з кутової сталі розміром 50 x50 x 5мм, довжиною 2,5 м, що знаходиться на відстані один від одного 4,5 м і з'єднаних сталюю смугою розміром 40 x 4 мм.

6 Визначаємо опір розтікання одного стрижня за формулою

$$R_{o.y.} = 0,00318 \rho \cdot K_c.$$

Приймаємо за таблицею 3.1, $\rho = 1 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, та за табл. 3.2, $K_c = 1,7$, тоді: $R_{o.y.} = 54,1 \text{ Ом}$.

7 Приймаємо довжину сталеві смуги 120 м і визначаємо опір розтікання за вищевказаними формулами (3.8)

$$R_z = 6,05 \text{ Ом}$$

3 урахуванням екранування між смугою та стержнями (за табл.3.5)

$$K_{\text{ек}} = 0,31,$$

тоді $R_{\Sigma} = 19,5 \text{ Ом}$.

8 Необхідний опір розтікання стрижнів складає

$$R_c = 3,06 \text{ Ом.}$$

9 Визначаємо кількість n стрижнів, враховуючи, що коефіцієнт використання

$$K_{\text{ев}} = 0,62, \text{ тоді } n = 2.$$

Після монтажу слід провести виміри фактичної величини опору розтікання струму блискавки заземлюючого пристрою.

3.2 Приклад 2 розрахунку заземлення

1 Відповідно до Укр. ПУЕ визначають опір заземлювача ($R_z < 1 \text{ Ом}$).

2 Відповідно до відведеної території розробляють конструкцію, визначають конфігурацію і місце розташування заземлювача (по контуру и площині).

3 Визначають остаточно опір штучного імпульсного заземлення R_i .

4 Визначають розрахунковий питомий опір ґрунту ρ_p з врахуванням підвищуючого коефіцієнта, що враховує його висихання та промерзання K_n .

$$(K_{пг} = 2; K_{пв} = 1,4); \quad \rho_{pв} = K_{пв} \cdot \rho; \quad \rho_{pз} = K_{пг} \cdot \rho. \quad (3.11)$$

5 Визначають опір розтіканню струму горизонтального заземлювача

$$R_{г\Sigma} = \frac{\rho_{пг}}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2 \cdot l^2}{b \cdot t}, \quad (3.12)$$

де l – загальна довжина горизонтального заземлювача; b – ширина смуги (4 см); t – її товщина (4 мм).

6 Визначають розрахунковий опір розтікання горизонтального заземлювача $R_{ргв}$ з врахуванням коефіцієнта використання $K_{вз}$, який враховує взаємне екранування сусідніх електродів ($K_{вг} = 0,8$)

$$R_{ргв} = R_{рг} / K_{вг}. \quad (3.13)$$

7 Визначають опір розтіканню одного вертикального заземлювача

$$R_{в1} = \frac{\rho_{пв}}{2\pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right), \quad (3.14)$$

де $\rho_{пв}$ – розрахунковий питомий опір ґрунта для вертикального заземлювача; l – довжина вертикального заземлювача; t – відстань від поверхні землі до середини заглибленого заземлювача; d – діаметр вертикального заземлювача (верхній кінець заземлювача заглиблений на 0,7 м).

8 Визначають розрахунковий опір вертикального заземлювача з врахуванням коефіцієнта використання $K_{вв}$ ($K_{вв} = 0,61$).

$$R_{в1р} = R_{в1} / K_{вв}. \quad (3.15)$$

9 Визначають необхідний опір вертикальних заземлювачів з врахуванням сумарного опору горизонтальних заземлювачів

$$R_{в\Sigma} = R_{ргв} \cdot R_i / (R_{ргв} - R_i). \quad (3.16)$$

10 Визначають число вертикальних електродів N за формулою

$$N = R_{в\Sigma} / R_{в1р}. \quad (3.17)$$

4 ЗАХИСТ ПС ВІД ІМПУЛЬСІВ НАБІГАЮЧИХ ПЕРЕНАПРУГ

Ізоляція електроустановок повинна надійно працювати як при довгостроково прикладених робочих напругах промислової частоти, так і при виникаючих короткочасних перенапругах грозового чи комутаційного характеру. Грозові перенапруги виникають при прямому ударі блискавки в електроустановку, а також при ударі блискавки в землю чи предмети, або об'єкти, що знаходяться поблизу електроустановки (індукційні перенапруги). Комутаційні (внутрішні) перенапруги виникають при різного роду комутаціях ланцюгів у нормальних експлуатаційних умовах, а також при комутаціях, пов'язаних з виникненням і ліквідацією аварійних режимів і ушкоджень в електричній системі.

Від грозових перенапруг основним елементом захисту є вентильні розрядники різного типу і метало-оксидні обмежувачі (ОПН).

Рівень грозових перенапруг мережі не залежить від її номінальної напруги, а рівень внутрішніх перенапруг, навпаки, залежить від величини номінальної напруги. З цієї причини вибір рівня ізоляції електроустаткування до 220 кВ включно, в основному лімітується рівнем грозових перенапруг, а рівень ізоляції електроустаткування 330 кВ і вище – рівнем внутрішніх перенапруг.

4.1 Внутрішні перенапруги

Внутрішні перенапруги поділяються на квазістаціонарні та комутаційні. *Квазістаціонарні* перенапруги, які існують відносно тривалий період часу, виникають при однофазних замиканнях, при неповнофазних режимах, при роботі довгих ЛЕП на холостому ході, при КЗ, а також при виникненні в мережі резонансу або ферорезонансу на основній частоті, високих чи низьких гармоніках. *Комутаційні* перенапруги виникають при ввімкненні чи відключенні ЛЕП, трансформаторів, реакторів і дугогасних котушок, при виникненні дуги замикання на землю в системах з незаземленими нейтралями.

Комутаційні перенапруги можуть досягати $3,5U_{\phi}$ і перевищувати рівень ізоляції електроустановок 330, 550 і 750 кВ.

Величина внутрішніх перенапруги характеризуються їх кратністю

$$K = U_{\text{макс}} / U_{\text{ф.раб.нб}}, \quad (4.1)$$

тривалістю фронту комутаційного імпульсу $\tau_{\phi} = 250 \pm 50$ мкс та тривалістю імпульсу $\tau_i = 2500 \pm 500$ мкс (250 / 2500 мкс).

В енергосистемах України з врахуванням можливих величин перенапруг і техніко-економічних характеристик, згідно з рекомендаціями МЕК, рівень електричної міцності ізоляції для комутаційних перенапруг повинен складати близько 80 % імпульсного рівня ізоляції.

4.2 Грозові перенапруги

Грозові перенапруги характеризуються струмом блискавки, який має вигляд уніполярного аперіодичного імпульсу з амплітудою струму I_b , тривалістю імпульсу τ_i , тривалістю фронту імпульсу τ_{ϕ} і середньою крутістю a :

$$a = dI_{\text{макс}} / dt_p. \quad (4.2)$$

Зареєстровано амплітуди струмів блискавки від сотень амперів до 300 кА із середньою крутістю a від 2 до 60 кА/мкс і тривалістю від 20 до 80 мкс. Імовірність появи блискавок з верхньою межею параметрів достатньо мала, тому за розрахункові звичайно приймають:

$$I_{b.\text{макс}} = 150 \text{ кА}; \quad a = 60 \text{ кА/мкс}; \quad \tau_i = 40 \text{ мкс}; \quad \tau_{\phi} = 1,5 \text{ мкс}.$$

Виникаючи під час грози в лініях електропередачі імпульси грозових перенапруг поширюються по мережі і впливають на ізоляцію як самих ЛЕП, так і електроустаткування електричних станцій і підстанцій. Захист електроустановок від грозових перенапруг здійснюється розрядниками і ОПН. Основним засобом захисту від грозових перенапруг є вентильні розрядники і ОПН. Їх використовують для захисту підстанційної ізоляції і встановлюють на

збірних шинах електроустановок, якщо до них підключені повітряні лінії електропередачі; на виводах вищої і середньої напруги автотрансформаторів; у ланцюгах силових трансформаторів і окремих ліній, якщо розрядники, встановлені на шинах, не забезпечують належного захисту устаткування; у нейтралях силових трансформаторів 110÷220 кВ, що працюють в системах з ізольованою нейтраллю.

Для ефективного захисту ізоляції електроустановок від перенапруг використовують розрядники типів РВС (розрядник вентиляний станційний), РВП (розрядник вентиляний підстанційний), РВМ (розрядник вентиляний магнітний) РЕМГ (розрядник вентиляний з магнітним гасінням) і РВВМ (розрядник вентиляний для обертаючих машин), а також ОПН (табл. 4.2– 4.4).

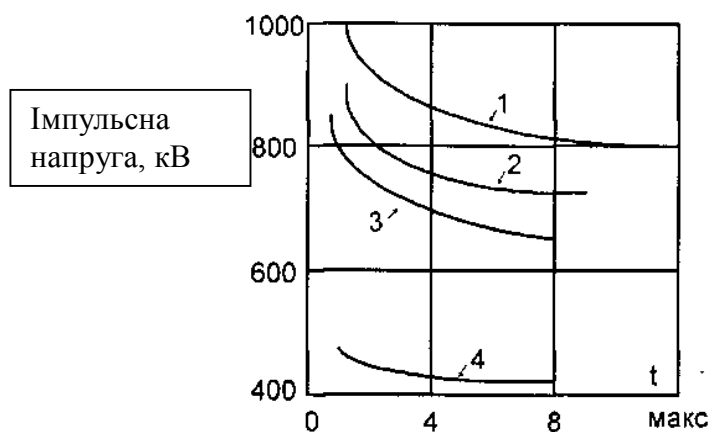


Рисунок 4.1– Імпульсні вольтамперні характеристики:

- 1– ізоляції ліній електропередач; 2 – трубчастого розрядника;
3 – силового трансформатора; 4 – вентиляного розрядника

Гранична величина супровідного струму $I_{\text{супр. макс}}$ для розрядників типу РВС дорівнює 80÷100 А, а для розрядників типу РВМГ – 250 А.

Напруга гасіння розрядників для мереж із різним режимом нейтралів повинна задовольняти умові

$$U_{\text{гас}} = K_3 \cdot U_{\text{ном.}} \quad (4.3)$$

Мережі з ефективним заземленням нейтралів мають $K_3 = 0,8$, тому в них встановлюються так звані 80 %-ві розрядники. В мережах 3÷35 кВ, де $K_3 = 1$,

встановлюються 100 %-ві розрядники. Режими роботи таких розрядників (звичайно їх називають комутаційними) істотно відрізняються від роботи грозозахисних розрядників. Перші спроможні довгостроково пропускати і потім обривати струми приблизно 1,5 кА при напрузі сталого режиму порядку $(1,5 \div 2)U_{\phi}$. Другі здатні, пропустивши короткочасний великий імпульсний струм, – погасити дугу супровідного струму при напругах у мережі порядку $(1,2 \div 1,3)U_{\phi}$.

Магнітно-вентильні; розрядники (РВМГ) на напруги до 220 кВ включно здатні обмежувати як грозові, так і більшість комутаційних перенапруг. Для мереж 330÷750 кВ розроблені розрядники, які одержали найменування комбінованих магнітно-вентильних розрядників (тип РВМК). Вони мають комбіновану вольтамперну характеристику, яка при струмах до 1,5 кА відповідає характеристиці комутаційного розрядника, а при струмах більших за 1,5 кА – характеристиці грозозахисного розрядника, що дозволяє їм виконувати функції комутаційного і грозозахисного розрядника.

Максимальна напруга на підстанційному електроустаткуванні при грозових і комутаційних перенапругах залежить від крутості фронту хвилі, що набігає, характеристик розрядника, а також від відстані між розрядником і електроустаткуванням, що захищається.

4.3 Схема заміщення для хвильових процесів

Припустимо, що у вузловій точці А схеми рис.4.2 ввімкнені елементи R , L та C , а також лінія з хвильовим опором Z . Якщо на цей вузол набігає хвиля з лінії, то для схеми застосоване поняття падаючої, переломленої і відбитої хвилі. Хвиля з напругою U_{np} у точці А буде розповсюджуватись по лініях із хвильовим опором Z_n .

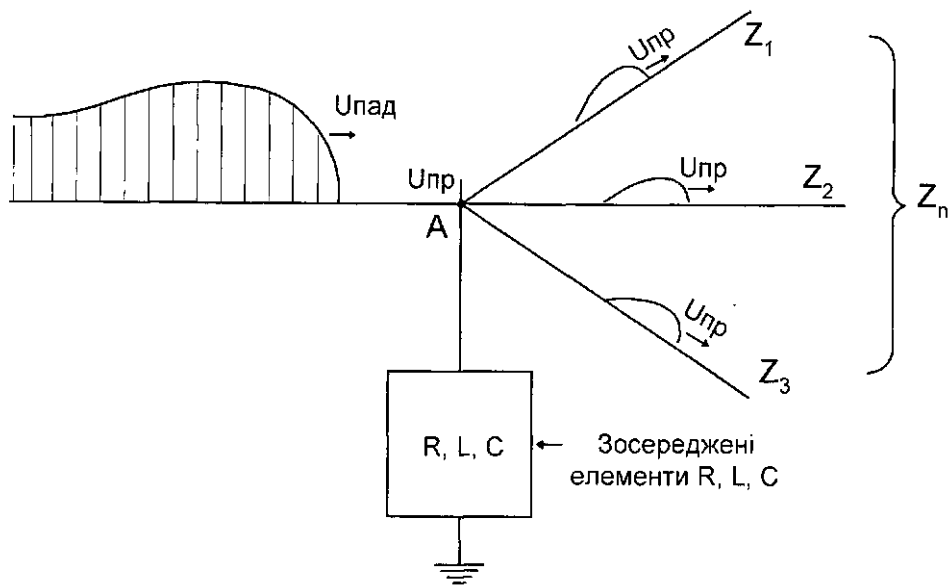


Рисунок 4.2 – Схема хвильових процесів в лінії

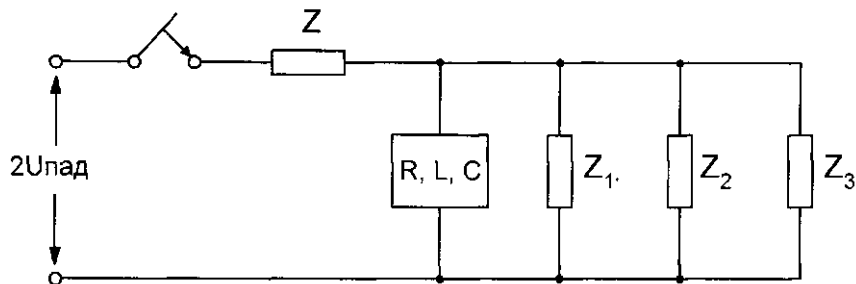


Рисунок 4.3– Схема заміщення для хвильових процесів

Для точки А можна записати:

$$U_{np} = U_{nad} + U_{vidb},$$

$$I_{np} = I_{nad} - I_{vidb},$$

$$U_{nad} = I_{nad} \cdot Z,$$

$$U_{vidb} = I_{vidb} \cdot Z.$$

Сумісне вирішення цих рівнянь дає:

$$U_{np} = 2U_{nad} - I_{np} \cdot Z. \quad (4.4)$$

Дане рівняння показує, що для визначення переломленої хвилі напруги можна використати еквівалентну схему (рис.4.4), де ізоляція замінена ємністю, і для якої дійсне рівняння

$$2 U_{\text{пад}} = I_p \cdot Z + U_p, \quad (4.5)$$

тут I_p , U_p – струм і напруга розрядника

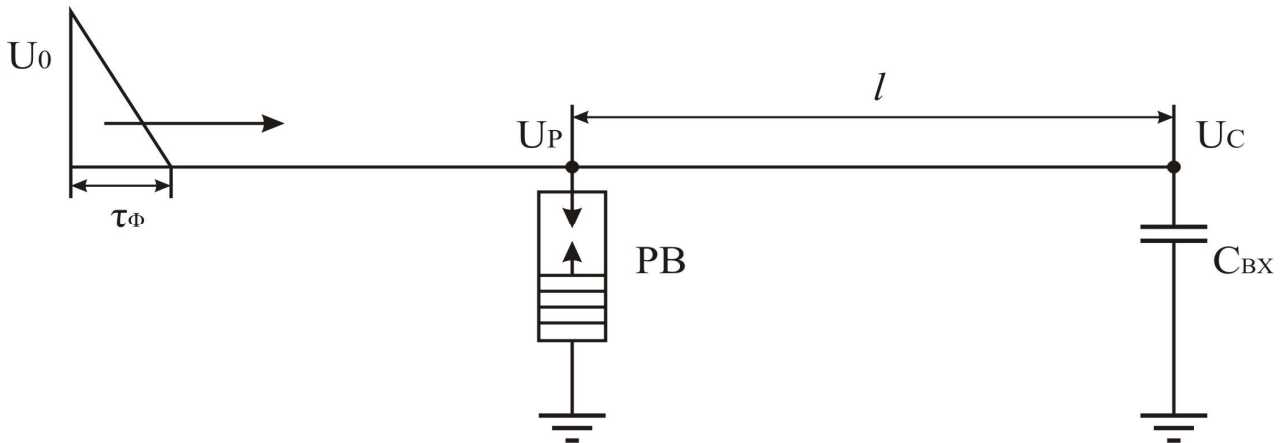


Рисунок 4.4 – Еквівалентна схема підходу до підстанції

На вузлову точку А набігає хвиля з напругою $U_{\text{пад}} = a \cdot t$. Рівняння (4.4) дозволяє визначити амплітуду хвилі, яка падає на розрядник і при якій струм координації буде знаходитись в заданих межах. Якщо він перевищить струм координації, напруга на розряднику може перевищити електричну міцність ізоляції. Внаслідок накладання відбитого імпульсу на падаючій, амплітуда напруги на розрядникові досягне величини (див. рис. 4.5)

$$U_{l\text{max}} = a \cdot t_p + a \cdot (t_p - 2 l / V), \quad (4.6)$$

тут l – відстань від РВ до точки А, V – швидкість розповсюдження імпульсу ($V = 300$ м/мкс). В точці А напруга за час $l / V = t_p$ досягне величини

$$U_{A\text{max}} = 2 a \cdot t_p. \quad (4.7)$$

Різниця напруг на електрообладнанні і розряднику дорівнює:

$$\Delta U = U_{A\text{max}} - U_{l\text{max}} = 2 a \cdot l / V. \quad (4.8)$$

Допустима напруга на трансформації підстанції визначається за виразом

$$U_{\text{дон}} = 1,1 \cdot (U_{50\%} - 0,5 \cdot U_{\text{ном}}), \quad (4.9)$$

або:

$$U_{\text{дон}} = U_p + 2 \cdot a \cdot l_{\text{дон}} / V, \quad (4.10)$$

де U_p – напруга пробою розрядника.

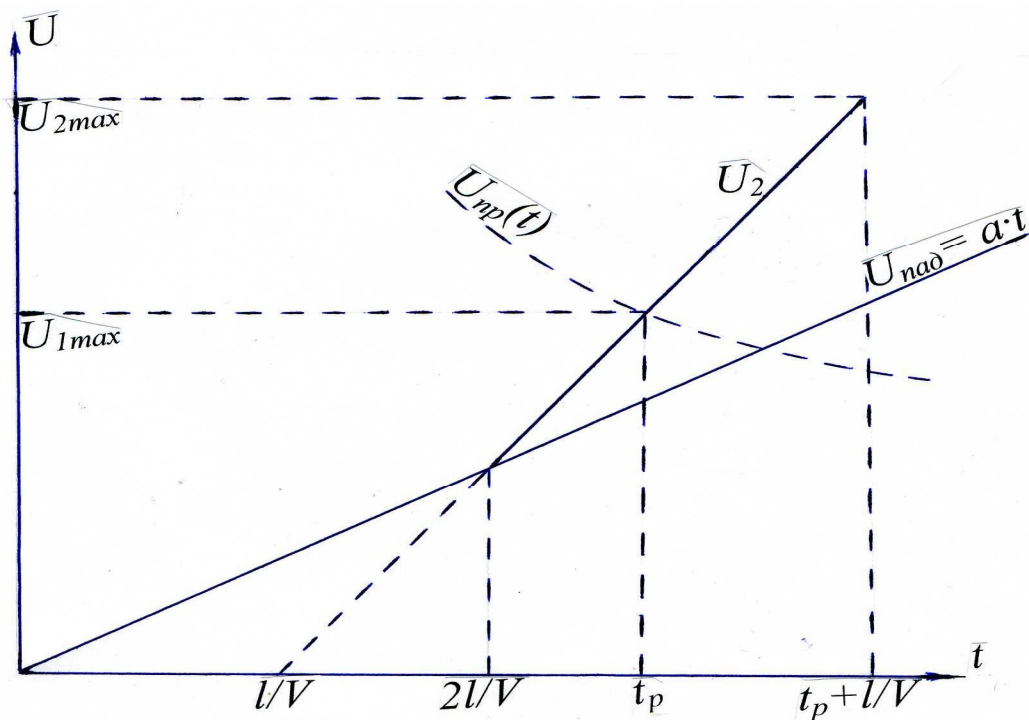


Рисунок 4.5 – Визначення максимальної напруги на обладнанні, віддаленому від точки приєднання вентильного розрядника

Приклад. Визначити допустиму відстань від точки приєднання розрядника до трансформатора тупикової підстанції 35 (110) кВ, якщо відомо, що напруга пробою розрядника РВС-35 (110) кВ дорівнює 125 (285) кВ, залишкова напруга на розряднику 125 (315) кВ, рівень ізоляції трансформатора дорівнює 210 (335) кВ, а максимальна крутість імпульсу перенапруги $a = 300$ (100) кВ/мкс.

Підставимо ці дані в (4.10):

$$210 = 125 + 2 \cdot 300 \cdot l_{\text{дон}} / 300 = 42,5 \text{ м};$$

$$335 = 285 + 2 \cdot 100 \cdot l_{\text{дон}} / 300 = 75 \text{ м}.$$

При розповсюдженні по лінії імпульс напруги деформується і затухає внаслідок імпульсної корони і опору землі, оскільки струм імпульсу замикається на землю

Тривалість фронту прямокутного деформованого імпульсу $t_{\text{фр}}$ після проходження ним відстані l :

$$t_{\text{фр}} = \rho \cdot l^2 / 260 \cdot h^2 \cdot Z^2, \text{ (мкс)}, \quad (4.11)$$

тут ρ – питомий опір ґрунта, Ом·м; h – середня висота підвісу проводів, м;

Z – хвильовий опір лінії, Ом.

Або
$$t_{\phi p} = B \cdot U_{max} \cdot l / V, \quad (4.12)$$

а крутість фронту знизиться з ∞ до $a = U_{lmax} / t_{\phi p}$,

або
$$a = V / B \cdot l, \quad (4.13)$$

тут $B \sim 0,5 \cdot 10^{-3}$ (1/кВ).

Середню крутість фронту імпульсу можна визначити з виразу

$$a_{cp} = I_0 / \tau_{\phi}; \quad \text{або} \quad a_{cp} = U_{50\%} / \tau_{\phi}, \quad (4.14)$$

де $\tau_{\phi} = l / V$, мкс.

Подовження фронту імпульсу напруги на протязі 1 км пробігу

$$\Delta \tau_{\phi} = \left(0,5 + \frac{0,008 \cdot U_{max}}{h} \right) \cdot \frac{1}{K}, \quad (4.15)$$

де K – коефіцієнт = 1; 1,14; 1,45; 1,55 – для 1, 2, 3, 4 – числа проводів у фазі.

Амплітуда імпульсу при його розповсюдженні зменшується за законом:

$$U = U_{max} e^{-a\sqrt{x}}, \quad (4.16)$$

де x – відстань до точки удару блискавки; a – коефіцієнт = $0,07 \text{ км}^{-0,5}$ для ліній напругою 110 кВ і вище. При розрахунках U_{max} приймають рівним $U_{50\%}$

лінійної ізоляції, а зменшенням амплітуди імпульсу нехтують.

Деформація фронту імпульсу на відстані l від точки виникнення:

$$\Delta t \approx B \cdot U_{max} \cdot (l / V). \quad (4.17)$$

Таблиця 4.1 – Величина 50 % випробувальних напруг лінійної ізоляції

$U_{ном}, \text{ кВ}$	35	110	220	330	500
$U_{50\%}, \text{ кВ}$	200	480	750	1050	1550

Необхідну довжину захищеного підходу до ПС можна визначити за формулою

$$l_{zn} \geq U_{50\%} / a_{кр} \cdot \Delta \tau_{\phi}, \text{ м.} \quad (4.18)$$

або
$$l_{zn} \geq \left(\frac{V}{a_{кр} \cdot B} \right) \cdot 10^{-3}, \text{ м.} \quad (4.19)$$

4.4 Приклад розрахунку захищеного підходу до ПС

Приклад 1

Вихідні дані:

$$U_n = 35 \text{ кВ}; \quad U_{50\%} = 200 \text{ кВ}; \quad I_0 = 60 \text{ кА};$$

$$K = 1,45; \quad B = 0,4; \quad Z = 300 \text{ Ом};$$

Визначаємо критичну крутість фронту імпульсу, що набігає на ПС

$$a_{кр} = 60 \text{ кА/мкс} . \quad (a_{кр} = 40 \text{ кА/мкс}).$$

Знаходимо допустиму напругу на трансформаторі $U_{дон}$ за формулою (4.9):

$$U_{дон} = 1,1 \cdot (200 - 0,5 \cdot 35) = 200,75 \text{ кВ}.$$

Знаходимо зміну тривалості фронту імпульсу $\Delta\tau_\phi$ на 1 км лінії згідно з (4.10):

$$\Delta\tau_\phi = (0,5 + 0,008 \cdot U_{\max} / h) \cdot 1 / K = (0,5 + 0,008 \cdot 200 / 10) \cdot 1 / 1,45 = 0,44 \text{ с/км}.$$

Знаходимо довжину захищеного підходу до ПС згідно з (4.13):

$$l_{zn} \geq U_{50\%} / a_{кр} \cdot \Delta\tau_\phi = 200 / 40 \cdot 0,44 = 2,2 \text{ (км)};$$

$$l_{zn} \geq U_{50\%} / a_{кр} \cdot \Delta\tau_\phi = 200 / 60 \cdot 0,44 = 1,47 \text{ (км)}.$$

Згідно з (4.16) $l_{zn} \geq (300 / 40 \cdot 0,5) \cdot 10^{-3} = 18,75 \cdot 10^{-3} \text{ км}.$

Знаходимо t_ϕ після проходження імпульсу відстані l_{zn} :

$$t_\phi = B \cdot U_{A\max} \cdot l_{zn} / V = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 / 0,33 = 3,3 \text{ мкс};$$

$$t_\phi = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,47 / 0,33 = 2,2 \text{ мкс}.$$

Розрахуємо деформацію фронту імпульсу після пробігу ним l_{zn}

$$\Delta t(U) \approx l \cdot B \cdot U / V = 2,2 \cdot 0,5 \cdot 200 \cdot 10^{-3} / 300 = 0,733 \text{ мкс}.$$

Знаходимо час проходження імпульсом відстані l_{zn}

$$t_p = l_{zn} / V = 2,2 / 0,33 = 6,66 \text{ мкс}$$

Знаходимо напругу в точці А (4.7)

$$U_{A\max} = 2 \cdot a \cdot t_p = 2 \cdot 40 \cdot 6,66 = 532,8 \text{ кВ}.$$

Знаходимо $\Delta U = U_{A\max} - U_{\max} = 2 \cdot a \cdot l / V = 2 \cdot 60 \cdot 1,7 / 300 = 0,68 \text{ кВ}.$

$$\Delta U = U_{A\max} - U_{\max} = 2 \cdot a \cdot l / V = 2 \cdot 40 \cdot 2,2 / 300 = 0,6 \text{ кВ}.$$

За результатами розрахунків вибираємо розрядник РВМ-35 (табл. 4.2) для захисту ПС від набігаючих імпульсів перенапружень.

Таблиця 4.2 – Електричні характеристики вентильних розрядників

Номинальна напруга , кВ	Група розрядника	Тип розрядника	Напруга , кВ					
			Найбільше допустиме	Пробивне	Імпульсне пробивне при часах 1,5- 20 мкс	Що залишається при імпульсному струмі з тривалістю фронту 8 мкс і амплітудою, кА		
						3	5	10
						Максимальне значення, не більш		
3	I	PBT, PBRД	3,8	7,5–9	7	7	8	9
	II	PBM		7,5–9	8	9	9,5	11
	IV	PBP, PBO		9–11	20	13	14	-
6	I	PBT, PBRД	7,6	15–18	14	14	16	18
	II	PBM		15–18	15,5	17	18	20
	IV	PBP, PBO		16–19	32	25	27	-
10	I	PBT	12,7	25–30	23,5	23,5	26,5	30,5
	II	PBM		25–30	25,5	28	30	33
	IV	PBP, PBO		26–30,5	48	43	45	-
15	I	PBM	19	31–36	50	38	41	46
	II	PBC		35–43	57	47	51	57
	III			38–48	67	57	61	67
20	I	PBM	25	42–48	66	50	54	60
	II	PBC		47–56	74	62	67	74
	III			49–60,5	80	75	80	88
35	I	PBM	40,5	73–84	108	80	87	98
	II	PBC		75–90	116	97	105	116
	III			78–98	125	122	130	143
110	I	PBT	100	150–170	230	195	215	240
	II	PBMГ		170–195	260	245	265	295
	III	PBC		200–250	285	315	335	367
150	I	PBT	138	210–240	310	265	295	330
	II	PBMГ		230–265	370	340	370	410
	III	PBC		275–245	375	435	465	510
220	I	PBT	200	300–350	445	390	430	480
	II	PBMГ		340–390	515	475	515	570
	III	PBC		400–500	530	630	670	734
330	I	PBT	290	435–500	630	555	615	700
	II	PBMГ		485–560	740	660	725	800
500	I	PBT	420	630–725	940	805	890	1010
	II	PBMГ		660–760	1070	985	1070	1180

Приклад 2. Визначити t_{ϕ} після пробігу $l_{zn} = 2$ км на лінії $Z = 500$ Ом;

$h = 10$ м; $\rho = 10^3$ Ом · м. Використаємо формулу (4.11)

$$t_{\phi} = \frac{10^3 \cdot 4 \cdot 10^6}{260 \cdot 10^2 \cdot 25 \cdot 10^4} = 0,6 \text{ мкс.}$$

За результатами проведених розрахунків зробити висновок про придатність захисних апаратів до експлуатації та можливості включення їх у схему мережі.

5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ

Роботу необхідно оформлювати на аркушах формату А4. На титульному аркуші повинно бути вказано: прізвище, ім'я та по батькові студента, курс, група, спеціальність. Крім того, вказують посаду та прізвище викладача, який викладає цю дисципліну. У Вступі необхідно:

- обґрунтувати актуальність та значущість даної роботи;
- визначити мету і конкретні завдання розрахунку;
- визначити об'єкт і предмет дослідження;
- провести огляд літературних джерел за темою роботи;
- проаналізувати особливості функціонування предмета дослідження;
- сформулювати задачу та вибрати методику проведення розрахунків.

В основній частині необхідно грамотно, стисло, логічно й аргументовано викласти зміст і результати роботи. При цьому слід уникати загальних слів, бездоказових тверджень, тавтології. Використані умовні позначення і одиниці фізичних величин повинні відповідати ЕСКД, ДСП та системі СІ. Необхідно належним чином оформити текстову і графічну частину роботи. Вимоги до побудови, викладання та оформлення роботи повинно відповідати Державному стандарту України ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення».

В кінці роботи необхідно сформулювати висновки, в яких логічно викласти та проаналізувати одержані результати розрахунку. Необхідно також навести відповідним чином оформлений список використаної літератури, посилання на яку повинно міститися в тексті основної частини

Додаток А

Значення опору вентильних розрядників (елементів розрядників)

Тип розрядника або елемента розрядника	Опір, МОм	
	не менше	не більше
РВМ-3	15	40
РВМ-6	100	250
РВМ-10	170	450
РВМ-15	600	2000
РВМ-20	1000	10000
Елементи розрядника РВМ-35:	600	2000
РВРД-3	95	200
РВРД-6	210	940
РВРД-10	770	5000
Елементи розрядника РВМЛ-66	250	1000
Елементи розрядників РВМА-220	400	2500
РВМГ-110М	400	2500
РВМГ-150М	400	2500
РВМГ-220М	400	2500
РВМГ-330М	400	2500
РВМГ-400, РВМГ-500	400	2500
Основний елемент розрядників РВМК-330	150	500
Іскровий елемент розрядників РВМК-330, РВМК-	300	1400
Основний елемент розрядника РВМК-400П	120	500
Іскровий елемент розрядника РВМК-400П	300	1400
Елемент розрядника РВМК-400В'''	1500	7000
Елемент розрядника РВМК-750М	1300	7000

Допустимі струми провідності вентиляльних розрядників і елементів

Тип розрядника або елемента розрядника	Значення випрямленої напруги, при якій вимірюється струм провідності, кВ	Струм провідності, мкА, при температурі опору 20°C	
		не менше	не більше
1	2	3	4
PBM-3	4	380	450
PBM-6	6	120	220
PBM-10	10	200	280
PBM-15	18	500	700
PBM-20	24	500	700
PBC-15	16	200	340
PBC-20	20	200	340
PBC-35*	32	200	340
PBC-15	16	450	620
PBC-20	20	450	620
PBC-29	28	450	620
PBC-33	32	450	620
PBC-35	32	450	620
PBRД-3	3	30	85
PBRД-6	6	30	85
PBRД-10	10	30	85
PB-25	28	400	650
PBE-25M	28	400	650
PBME-25	32	400	650
Елементи розрядників: PBMA-66, PBMA-220, PBMГ-110M, PBMГ-150M, PBMГ-220M, PBMГ-330M, PBMГ-400, PBMГ-500	18	1000	1350
	-	1000	1350
	-	1000	1350
	30	1000	1350

Додаток В

Допустимі значення струму провідності та найменші допустимі значення виміряного мегомметром опору обмежувача перенапруг (ОПН)

Тип обмежувача перенапруг	Найбільша робоча напруга (діюча), кВ	Діапазон допустимих значень струму провідності, виміряних при $U_{н.р.}$ під час випуску з підприємства - виготовлювача, мА	Значення випробувальної напруги промислової частоти, кВ	Значення струму провідності, діюче, мА, виміряне в експлуатації, при досягненні якого необхідно		Найменший допустимий опір ОПН, виміряний мегомметром 2,5 кВ, МОм
				ОПН зняти з експлуатації	вирішувати питання щодо заміни ОПН	
ОПН-СН-6	4,0	Не більше 05	4,0	Більше 0,5	-	2000
ОПН-КС-10	7,0	Не більше 0,5	7,0	Більше 0,5	-	5000
ОПН-П1-Е	7,2	-	7,2	Більше $\pm 20\%$ від паспортного	-	~
ОПН-П1-10	12,0	-	12,0	Те саме	-	-
ОПН-П1-15	18,0	-	18,0	„”.	-	-
ОПН-П1-20	24,0	-	24,0	„”.	-	-
ОПН-П1-35	40,5	-	40,5	„”.	-	-
ОПН-35	40,5	0,5-0,3	40,5	1,2	1,0	3000
ОПН-110, ОПН-110ПН	73,0	0,4-0,65	73,0	1,2	1,0	3000
ОПН-150	100,0	0,5-0,8	100,0	1,5	1,2	3000
ОПН-220 ОПН-220ПН	146,0	0,6-0,9	100,0	1,8	1,4	3000
ОПН-330 ОПН-330ПН	210,0	1,1-1,5	100,0	3,0	2,4	3000
ОПН-500 ОПН-500ПН	303,0	1,8-2,8	100,0	5,5(4,5)*	4,5(3,8)	3000
ОПН-750	455,0	1,7-3,8	100,0	7,2	6,0	3000
ОПНО-750	455,0	1,4-2,9	100,0	5,5	4,5	3000

ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ ДО РОЗРАХУНКОВО–ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

№ п/п	Розмір об'єкту	№ п/п	Розмір об'єкту	№ п/п	Розмір об'єкту
1	70x140x4, ПС110/10	29	90x150x4, ПС110/10	57	110x185x5, ПС35/10
2	70x145x5, ПС35/10	30	90x155x5, ПС35/10	58	110x190x4, ПС110/10
3	70x150x4, ПС110/10	31	90x160x4, ПС110/10	59	120x170x4, ПС35/10
4	70x155x5, ПС35/10	32	90x165x4, ПС35/10	60	120x175x5, ПС110/10
5	70x160x4, ПС110/10	33	90x170x5, ПС110/10	61	120x160x4, ПС35/10
6	70x165x5, ПС35/10	34	90x175x4, ПС35/10	62	120x165x5, ПС110/10
7	75x140x5, ПС110/10	35	90x180x5, ПС110/10	63	120x180x4, ПС35/10
8	75x145x4, ПС35/10	36	90x185x4, ПС35/10	64	120x180x5, ПС35/10
9	75x150x5, ПС110/10	37	95x160x5, ПС110/10	65	120x185x4, ПС110/10
10	75x155x4, ПС35/10	38	95x165x4, ПС35/10	66	120x190x5, ПС35/10
11	75x160x5, ПС110/10	39	95x170x5, ПС110/10	67	120x195x4, ПС110/10
12	75x165x4, ПС35/10	40	95x175x4, ПС35/10	68	120x1100x5, ПС35/10
13	75x160x5, ПС110/10	41	95x180x5, ПС110/10	69	120x160x5, ПС110/10
14	75x155x5, ПС35/10	42	95x155x4, ПС35/10	70	120x165x4, ПС35/10
15	80x160x4, ПС110/10	43	100x190x4, ПС35/10	71	120x150x5, ПС110/10
16	80x165x5, ПС35/10	44	100x185x5, ПС110/10	72	120x155x4, ПС35/10
17	80x140x5, ПС110/10	45	100x160x5, ПС35/10	73	120x170x4, ПС110/10
18	80x145x4, ПС35/10	46	100x165x4, ПС110/10	74	125x175x5, ПС35/10
19	80x150x5, ПС110/10	47	100x170x5, ПС35/10	75	125x180x4, ПС110/10
20	80x155x4, ПС35/10	48	100x175x4, ПС110/10	76	125x185x5, ПС35/10
21	80x160x5, ПС110/10	49	100x190x4, ПС35/10	77	125x160x4, ПС110/10
22	80x170x5, ПС35/10	50	100x150x5, ПС110/10	78	125x165x5, ПС35/10
23	80x175x4, ПС110/10	51	100x155x4, ПС35/10	79	125x150x4, ПС110/10
24	85x165x5, ПС35/10	52	110x160x4, ПС110/10	80	125x155x5, ПС35/10
25	85x170x4, ПС110/10	53	110x165x5, ПС35/10	81	125x140x4, ПС35/10
26	85x175x4, ПС35/10	54	110x170x4, ПС110/10	82	125x145x5, ПС35/10
27	85x180x4, ПС110/10	55	110x175x5, ПС35/10	83	130x130x5, ПС110/10
28	85x180x5, ПС35/10	56	110x180x4, ПС110/10	84	155x190x4, ПС35/10

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Базуткин В. В. Техника высоких напряжений. / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов. – Москва : Энергоатомиздат. – 1998. – 483 с.
2. Бібіков М. О. «Техніка високих напруг» / М. О. Бібіков, Н. С. Комаров, О. С. Сергєєв. – Київ : Вища школа. – 2002. – 375 с.
3. Найфельд М. Р. Заземление и другие защитные меры / М. Р. Найфельд. – Москва : Энергия. – 1975. – 347 с.
4. Ларионов В. П. «Защита жилых домов и промышленных зданий от молнии», Москва : Энергоатомиздат. – 1974. – 234 с.
5. Техника высоких напруг / Под ред. Г. С. Кубинского. – Санкт-Петербург : Энергомашздат. – 2003. – 256 с.
6. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть станций и подстанций / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – Москва : Энергоатомиздат. – 1995. – 463 с.
7. Рой В. Ф. Конспект лекцій з курсу «Техніка високих напруг». / В. Ф. Рой; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. – 2016. – 160 с.
8. Горелов С. В. Изоляция и перенапряжения в системах электроснабжения. С. В. Горелов, Л. Н. Татьянченко. – Барнаул. – Изд-во Алт. ГТУ. – 2002. – 425 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахунково-графічної роботи
з курсу

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

*(для студентів 4 курсу денної та 5 курсу заочної форми
навчання напряму підготовки
6.050701 – Електротехніка та електротехнології
та слухачів другої вищої освіти спеціальності
7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання)*

Укладач **РОЙ** Віктор Федорович

Відповідальний за випуск *П. П. Рожков*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2016, поз. 495М

Підп. до друку 20.04.2016.
Друк на ризографі
Зам. №

Формат 60x84/16
Ум. друк. арк. 1,8
Тираж 50 пр.

Виконавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК 4705 від 28.03.2014 р.